

論文 コンクリート用細骨材としての溶融スラグの磨砕の効果に関する研究

錦織 和紀郎^{*1}・堺 孝司^{*2}・松家 武樹^{*3}・藤森 俊光^{*4}

要旨：近年，都市ごみや産業廃棄物の減容化や無害化のために，これらを高温で溶融処理することが一般的になりつつある。溶融処理は残渣としてスラグを発生させるが，これらの有効活用としてコンクリート用細骨材への適用が考えられる。本研究では，香川県豊島の廃棄物等溶融スラグに磨砕加工を施し，粒子の表面性状を改善することによるフレッシュおよび硬化コンクリートの基本的な特性への効果を検討した。その結果，磨砕加工を施し，スラグ粒子の改善により単位水量を低減できること，置換率40％までの範囲で強度低下が見られないこと，耐久性についても問題ないこと等が明らかになった。

キーワード：溶融スラグ，磨砕加工，細骨材，単位水量，圧縮強度，凍結融解，中性化

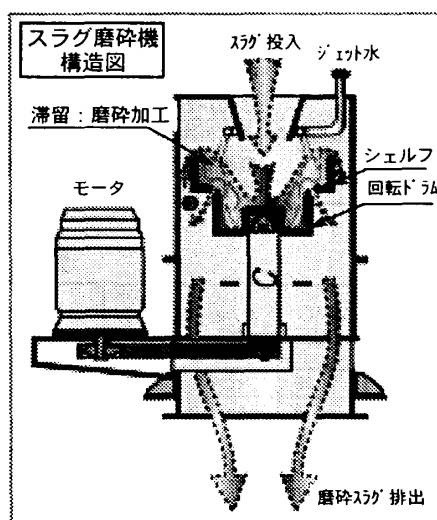
1. はじめに

近年，都市ごみや産業廃棄物の減容化や無害化のために，これらを高温で溶融処理することが一般的になりつつある。溶融処理は残渣としてスラグを発生させるが，これらの有効活用としてコンクリート用細骨材への適用が考えられる。溶融スラグをコンクリート細骨材として用いる場合，単位水量の増加¹⁾や強度低下²⁾等の問題が発生することが指摘されている。これらの原因として，前者については溶融スラグ粒子が角張っていることや針状粒子が含まれること，後者については溶融スラグ表面に発生したひび割れがスラグを脆弱にすることなどが考えられるが，これまで溶融スラグ粒子の表面性状がコンクリートの特性に及ぼす影響について着目した研究はほとんどない。そこで，本研究においては，香川県豊島の廃棄物等溶融スラグのコンクリートへの適用を図る上での一つの方法としてスラグに磨砕加工を施し，粒子の表面性状を改善することによるフレッシュおよび硬化コンクリートの基本的な特性への効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 磨砕加工

磨砕加工に用いた機械の概要を図－1に示す。この機械はスラグの加工改善用に開発されたもので，高速回転するドラムの中にスラグを投入し，スラグ粒子を割ることなく，スラグが回転する際のスラグ同士の摩擦により粒子の表面性状の改質を可能にするものである。



図－1 磨砕機の概要

*1 (株) テトラ テトラ総合技術研究所 工修 (正会員)

*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (正会員)

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科

2.2 使用材料

使用材料を表－１に示す。破碎スラグは香川県豊島に不法投棄された産業廃棄物等を同県直島環境センター中間処理施設にて溶融スラグ化したもので、破碎加工により粒度調整がなされている。また、磨砕スラグは、破碎スラグを磨砕機により磨砕加工して作製したものである。なお、磨砕スラグについては、ふるい分けして粒度を砕砂と同一に調整したスラグ（磨砕スラグ（粒度調整））も一部試験対象とした。

2.3 コンクリートの製造および配合

コンクリートは、容量100リットルの強制二軸ミキサーにより90秒間練混ぜて製造した。配合条件は、目標スランプ＝ 8 ± 2.5 cm、目標空気量＝ 4.5 ± 1.0 %とし、水セメント比W/Cは40%、50%および60%の3水準とした。また、スラグ置換率は20%および40%とし、比較のために砕砂のみ（スラグ置換率＝0%）の条件でも試験

を実施した。

配合決定においては、まず細骨材を砕砂のみとした条件で単位水量Wが 165kg/m^3 となるように、W/C毎に高性能A E減水剤の量を定めた。次に、スラグ使用の場合は高性能A E減水剤の量を砕砂のみの場合と同一とし、単位水量を増減して配合を定めた。表－２にコンクリートの配合一覧を示す。なお、空気量はA E剤により調整した。

2.4 検討項目

本研究における検討項目は、次の通りである。試験は、表－３に示す規準に従って実施した。

- (1) スラグの重金属含有量・溶出
- (2) 骨材・スラグの物理特性
- (3) フレッシュコンクリートの特性：配合、ブリーディング、凝結
- (4) 硬化コンクリートの特性：強度、静弾性係数、凍結融解抵抗性、中性化

表－１ 使用材料

材 料	細 別	備 考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm^3 比表面積 $3,280\text{cm}^2/\text{g}$
練混ぜ水	上水道水	
細骨材	砕砂	香川県塩江産（花崗岩系）
	破碎スラグ	香川県直島環境センター中間処理施設産、破碎加工による粒度調整済
	磨砕スラグ	破碎スラグを磨砕加工して作製
粗骨材	砕石	$G_{\text{max}}=20\text{mm}$ 、徳島県市場産（砂岩）
混和剤	高性能A E減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	A E 剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

3. 実験結果および考察

3.1 スラグの重金属含有量・溶出

表－４に、スラグの重金属含有量および溶出試験結果を示す。破碎スラグおよび磨砕スラグとも含有量については鉛が環境省告示第19号の基準値＝ 150mg/kg に近い値であったが、鉛以外は何れも基準値を大幅に下回った。また、溶出は、各項目とも検出限界値以下であった。

表－２ コンクリートの配合

No.	スラグ 種 別	W/C (%)	s/a (%)	スラグ 置換率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					高性能A E 減水剤 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	
					水	セメント	細 骨 材						粗骨材
							砕砂	破碎スラグ	磨砕スラグ				
1		40	43.6	0	165	413	733	0	0	961	0.90	9.0	3.5
2		50	45.7	0	165	330	799	0	0	962	1.05	10.0	4.2
3		60	47.1	0	165	275	844	0	0	961	1.20	8.0	4.9
4	破碎スラグ	40	43.6	20	162	405	0	0	0	969	0.90	10.0	3.9
5	破碎スラグ	50	45.7	20	162	324	0	0	0	969	1.05	8.0	4.0
6	破碎スラグ	60	47.1	20	165	275	0	0	0	961	1.20	8.0	4.0
7	破碎スラグ	40	43.6	40	158	395	0	0	0	980	0.90	10.0	4.0
8	破碎スラグ	50	45.7	40	159	318	0	0	0	976	1.05	10.0	4.2
9	破碎スラグ	60	47.1	40	160	267	0	0	0	972	1.20	8.0	4.5
10	磨砕スラグ	40	43.6	20	159	398	0	0	0	977	0.90	10.0	4.4
11	磨砕スラグ	50	45.7	20	158	316	0	0	0	978	1.05	10.0	3.8
12	磨砕スラグ	60	47.1	20	163	272	0	0	0	965	1.20	8.0	4.6
13	磨砕スラグ	40	43.6	40	159	398	0	0	0	977	0.90	10.0	3.7
14	磨砕スラグ	50	45.7	40	154	308	0	0	0	988	1.05	9.0	3.5
15	磨砕スラグ	60	47.1	40	159	265	0	0	0	974	1.20	9.0	4.4
16	磨砕スラグ (粒度調整)	60	47.1	40	159	265	0	0	0	974	1.20	7.5	5.0

3.2 骨材・スラグの物理特性

細骨材の骨材試験結果を表－5に、細骨材(単味)の粒度分布を図－2に、スラグ粒子の顕微鏡写真を写真－1および写真－2に示す。

これらの図表より、まずスラグの密度は砕砂の密度より大きいことが分かる。また、スラグの密度は磨砕加工によりやや大きくなる。これは、スラグ表面の脆弱な部分が削り取られたためと推定される。次に粒形に注目すると、破碎スラグの粒形判定実積率は砕砂のそれより小さいが、磨砕スラグの粒形判定実積率は59.3%とかなり大きく、磨砕加工による粒形改善の効果

が顕著である。このことは、粒子の顕微鏡写真からも分かる。また、砕砂とスラグの混合砂のスラグ置換率と実積率の関係は図－3の通りであり、スラグ置換率の増加に伴い実積率が増大し、その傾向は磨砕スラグの場合に著しい。

3.3 フレッシュコンクリートの特性

(1) 単位水量

表－2より、スラグ置換率の増加に伴い単位水量が低減され、磨砕スラグを用いた場合にその傾向が顕著であることが確認できる。これは、混合砂の実積率の変化に対応している。次に、磨砕スラグを用いた場合について、単位水量に

表－3 試験項目および試験方法一覧

試 験 項 目		試 験 規 準	
スラグの重金属含有量・溶出試験		環境省告示第19号, 環境省告示第46号	
骨 材 試 験	密度・吸水率	JIS A 1109 細骨材の密度及び吸水率試験方法 JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験方法	
	単位容積質量・実積率	JIS A 1104 骨材の単位容積質量及び実積率試験方法	
	粒度	JIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法	
	微粒分量	JIS A 1103 骨材の微粒分量試験方法	
	粒形判定実積率	JIS A 5005 コンクリート用砕石及び砕砂	
	コンクリート試験	フレッシュ	スランブ
空気量			JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)
ブリーディング			JIS A 1123 コンクリートのブリーディング試験方法
凝結時間			JIS A 6204 コンクリート用化学混和剤 附属書1 コンクリートの凝結時間試験方法
強 度		圧縮強度	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法
		静弾性係数	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法
耐久性		凍結融解抵抗性	JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法 (A法)
		中性化特性	日本建築学会 コンクリートの促進中性化試験方法 (案)

表－4 スラグの重金属含有量および溶出試験結果

スラグ種別		Cd	Pb	Cr ⁶⁺	As	Se	T-Hg	F	B
破碎スラグ	含有量(mg/kg)	0.4	128	<0.2	1.3	<0.1	<0.01	7	147
	溶出(mg/l)	<0.001	<0.005	<0.005	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.1	<0.1
磨砕スラグ	含有量(mg/kg)	0.4	147	<0.2	1.4	<0.1	<0.01	13	182
	溶出(mg/l)	<0.001	<0.005	<0.005	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.1	<0.1

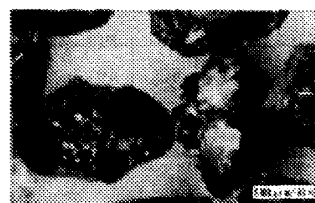
表－5 細骨材の骨材試験結果

骨材種別	密度(g/cm ³)		吸水率(%)	単位容積質量(kg/l)	実積率(%)	微粒分量(%)	粒形判定実積率(%)	粗粒率
	絶乾	表乾						
砕砂	2.50	2.55	2.35	1.55	62.1	3.5	56.8	2.63
破碎スラグ	2.68	2.71	1.18	1.69	63.2	2.0	54.8	2.53
磨砕スラグ	2.71	2.73	0.99	1.84	67.9	7.0	59.3	2.02

注) 本試験で使用したスラグはアルカリ骨材反応に関して無害



写真－1 破碎スラグの粒子



写真－2 磨砕スラグの粒子

及ぼすスラグ置換率とW/Cの影響を破碎スラグの場合との比較において詳細に見ると、スラグ置換率=20%の場合は全てのW/Cの条件で単位水量が減少したのに対し、スラグ置換率=40%の場合、W/C=40%と60%の条件では単位水量の減少は少なく、W/C=50%の場合のみで単位水量の減少が大きくなっている。このようにスラグ置換率が高い条件では、単位水量には細骨材率等の他の要因が微妙に影響しているものと考えられる。また、W/C=60%、スラグ置換率=40%の条件で磨砕スラグの粒度未調整と粒度調整（砕砂と同一の粒度）の場合を比較すると、単位水量は同等である。これは、磨砕加工により粒度が細くなる影響よりも、粒形改善の効果が卓越したためと推定される。

(2) ブリーディング

図-4にブリーディング試験結果を示す。単位水量の多い砕砂のみを用いたコンクリートのブリーディングが最も多いことが分かる。また、砕砂のみおよび破碎スラグを用いた場合、W/Cの増加とともにブリーディングが増加するが、磨砕スラグを用いた場合にはW/C=50%

の条件でその傾向を乱す結果となっている。この原因は必ずしも明確ではないが、スラグ置換=40%、W/C=50%の条件でブリーディングが少なかったのは、単位水量が最小であったためと考えられる。

(3) 凝結

凝結試験結果を図-5に示す。W/Cの増加に伴い凝結時間が遅れる傾向がある。また、スラグ置換が凝結時間を遅らせる傾向があるが、このことは、砕砂のみの場合が明らかに過早凝結を起こしていることを考慮すれば理解できる。用いた花崗岩系砕砂の凝結に及ぼす影響についての検討が必要である。

3.4 硬化コンクリートの特性

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-6に、同一材齢、同一W/Cの条件での砕砂のみの場合とスラグ使用時の圧縮強度の関係を図-7に示す。

まず、図-6よりスラグ置換率の影響に注目すると、破碎スラグおよび磨砕スラグの場合ともスラグ置換率=20%の条件で圧縮強度がやや大きくなる傾向がある。次に、図-7より、破

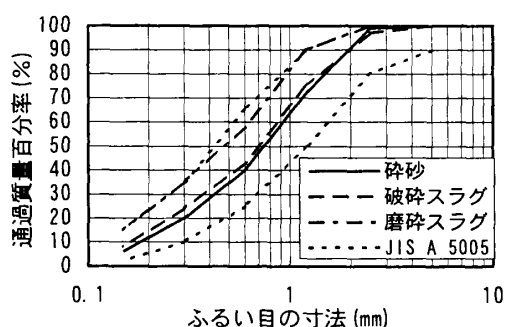


図-2 細骨材（単味）の粒度分布

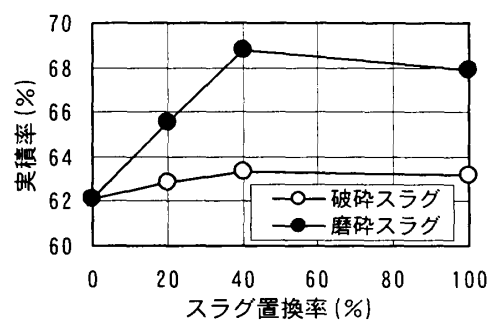


図-3 スラグ置換率と実積率の関係

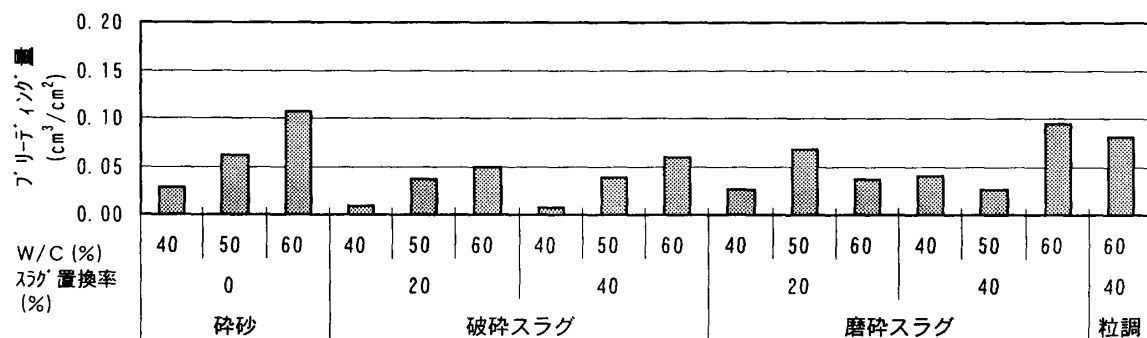


図-4 ブリーディング試験結果

砕スラグを置換率=40%で使用した場合強度低下が見られ、強度レベルが大きくなるにつれてその傾向は著しくなることが分かる。また、スラグ置換率=20%の場合にも、強度レベルの増大に伴い強度の増加割合がやや低下する傾向にある。一方、磨砕スラグを用いた場合には、強度レベルの増大に伴う強度低下の傾向は確認されない。これは、破碎スラグ粒子の表面のひび割れや角張りに起因した強度上の弱点が磨砕により改善されたためと考えられる。このように、磨砕によるスラグの表面性状の改善や粒度構成が複合体としてのコンクリートの性状を改善し、結果として強度改善に寄与したものと考え

られる。

(2) 静弾性係数

図-8に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。いずれのケースも強度が同一であれば静弾性係数は概ね同等であり、スラグ種別やスラグ置換率の影響は見られない。

(3) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験は、砕砂のみおよび磨砕スラグを用いた条件で実施した。W/C=60%の条件での試験結果を図-9に示す。砕砂のみの場合を除いて十分な凍結融解抵抗性がある。ここで、砕砂のみの条件における凍結融解抵抗性の著しい低下の原因は必ずしも明確ではないが、用い

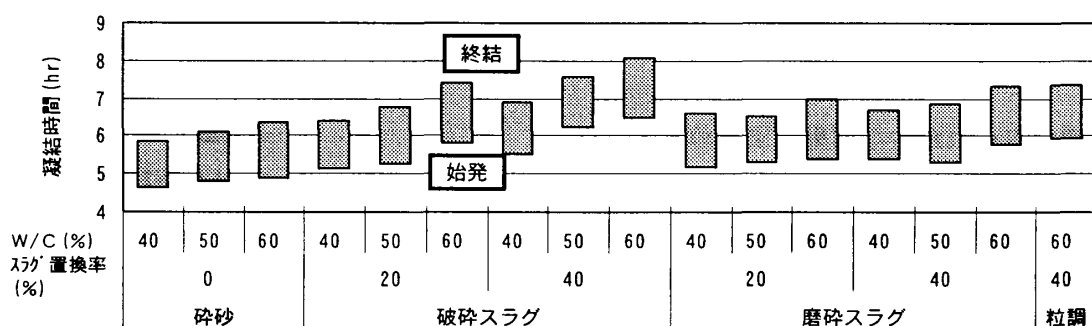


図-5 凝結試験結果

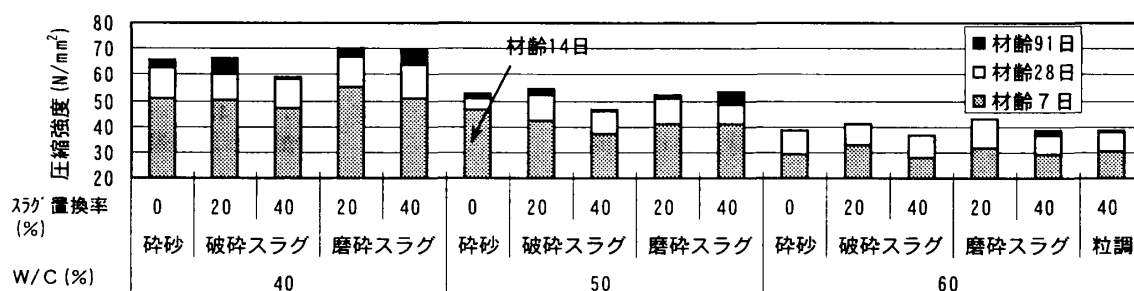


図-6 圧縮強度試験結果

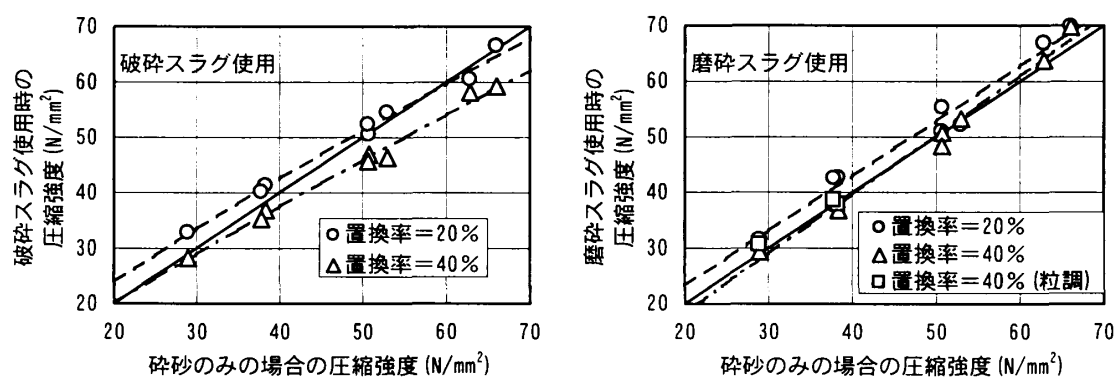


図-7 砕砂のみの場合とスラグ使用時の圧縮強度の関係

た砕砂の吸水率が2.35%と比較的大きな値であるとともに、ブリーディングが最も多かったことにより良質な空気を取り込むことができなかったなど、耐凍害性に最も厳しい条件であったことに起因している可能性がある。なお、 $W/C \leq 50\%$ の条件では、砕砂のみのケースも含めて何れも十分な凍結融解抵抗性が得られた。

(4) 中性化

促進中性化試験は、砕砂のみおよび磨砕スラグを用いた条件で実施した。材齢28日の圧縮強度と促進期間8週における中性化深さの関係を図-10に示す。圧縮強度の増大に伴い中性化深さは直線的に減少し、磨砕スラグを用いた場合にも中性化は強度に依存することが分かる。

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) スラグ置換による強度増減には、スラグ置換率およびスラグの表面性状等が複雑に影響する。
- (2) 磨砕加工による溶融スラグの粒子の粒形改善は、単位水量の低減に効果がある。
- (3) 磨砕加工により、破碎スラグに見られた粒子の強度上の弱点は改善され、磨砕スラグを使用した場合、砕砂のみの場合とほぼ同等の強度発現がある。
- (4) 磨砕スラグを使用した場合にも、十分な凍結融解抵抗性が確保される。
- (5) 磨砕スラグを使用した場合にも、中性化は主に強度に依存する。

なお、本研究は香川大学、株式会社テトラ、開成工業株式会社、トーヨカラー株式会社4者の共同研究として実施したものである。また、本研究の一部は、文部科学省研究補助金（基礎研究(B)(2)研究課題15360231 研究代表者：堺孝司）の助成により行った。

謝辞

本研究を実施するに当たり、香川県より溶融ス

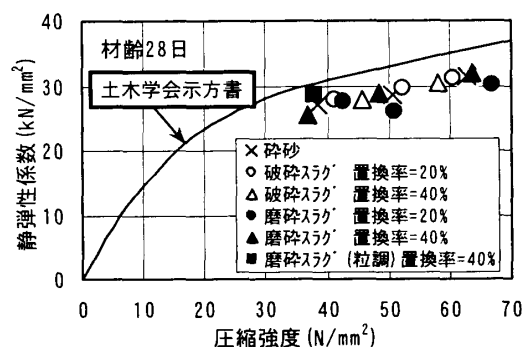


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

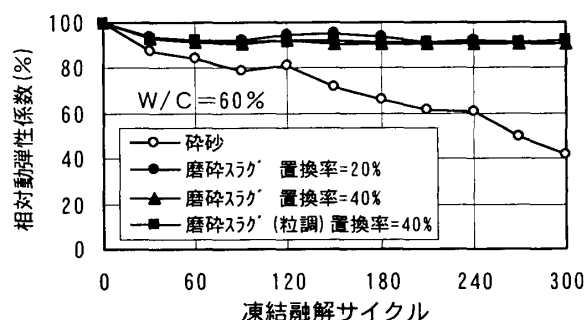


図-9 凍結融解試験結果

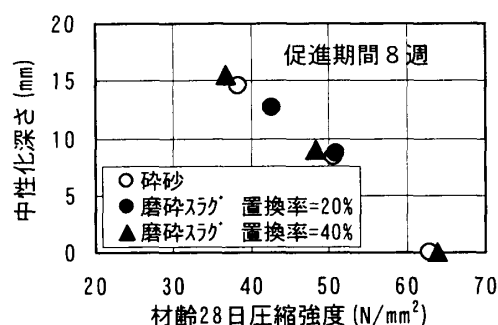


図-10 圧縮強度と中性化深さの関係

ラグの提供を受けた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 北辻政文，藤居宏一：ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質，農業土木学会論文集，No.200，pp.223-231，1999.4
- 2) 松山哲也，堺孝司，吉田秀典，高木茂：都市ごみ溶融スラグを用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.73-78，2001.6